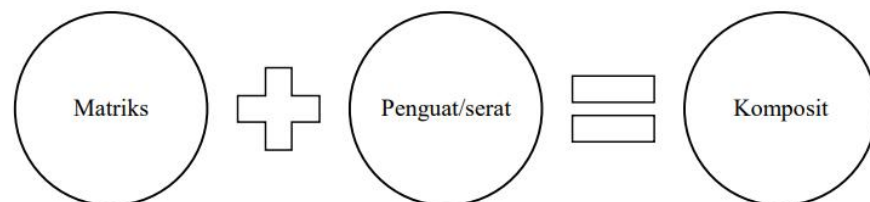


## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Komposit

Kata “komposit” berasal dari kata kerja “to compose” yang berarti menyusun atau menggabungkan, sehingga dapat diartikan sebagai gabungan dari beberapa bahan yang berbeda. Secara umum, material komposit terdiri dari dua komponen utama, yaitu serat (fiber) sebagai bahan penguat dan matriks sebagai bahan pengikat serat tersebut. Material komposit adalah bahan yang tersusun dari gabungan dua atau lebih unsur utama yang berbeda secara makro dalam bentuk dan komposisinya, yang pada dasarnya tidak dapat dipisahkan (Fahmi dan Hermansyah, 2011 : 47). Kombinasi antara serat dan matriks ini menghasilkan performa dan kekuatan komposit yang berbeda dari sifat bahan penyusunnya.



Gambar 2. 1 Komponen Penyusun Komposit  
*Sumber: (Hidayat Achmad 2019)*

Gambar tersebut menggambarkan struktur dasar dari material komposit yang terdiri atas dua komponen utama, yaitu matriks dan penguat /serat. Matriks berperan sebagai penyokong dan pengikat fasa penguat, yang berfungsi untuk menjaga kestabilan bentuk serta melindungi serat dari kerusakan lingkungan. Sementara itu, penguat atau serat bertindak sebagai elemen utama penahan beban

karena memiliki sifat mekanik yang lebih tinggi dibandingkan matriks. Kombinasi dari kedua komponen ini membentuk material komposit, yaitu suatu material hasil perpaduan dua atau lebih bahan yang berbeda fasa namun saling melengkapi, sehingga menghasilkan sifat akhir yang lebih unggul dibandingkan masing-masing komponennya secara terpisah.

Sifat dari material komposit sangat dipengaruhi oleh karakteristik serta distribusi unsur-unsur penyusunnya, juga oleh interaksi yang terjadi antara kedua bahan tersebut. Faktor lain yang penting dan dapat memengaruhi sifat komposit meliputi bentuk, ukuran, orientasi, dan penyebaran penguat (*filler*), serta berbagai karakteristik matriks.

Sifat mekanik menjadi salah satu aspek utama yang perlu dipelajari pada bahan komposit. Dalam aplikasi struktural, sifat mekanik sangat bergantung pada pilihan bahan. Kinerja mekanik komposit sangat ditentukan oleh sifat dari bahan penyusunnya. Dalam komposit berpenguat serat, fungsi utama serat adalah untuk menyalurkan tegangan antar serat, memberikan perlindungan terhadap kondisi lingkungan yang dapat merusak, serta melindungi permukaan serat dari pengaruh mekanis dan kimia. Peran serat sangat dominan dalam meningkatkan kekuatan bending dan ketangguhan dari bahan komposit. Umumnya, penguat komposit memiliki sifat yang kurang elastis namun lebih kaku dan kuat. Fungsi penguat adalah sebagai penopang utama kekuatan komposit, sehingga tingkat kekuatan material komposit sangat bergantung pada kualitas penguat yang digunakan. Tegangan yang diterima oleh komposit awalnya disalurkan oleh matriks dan

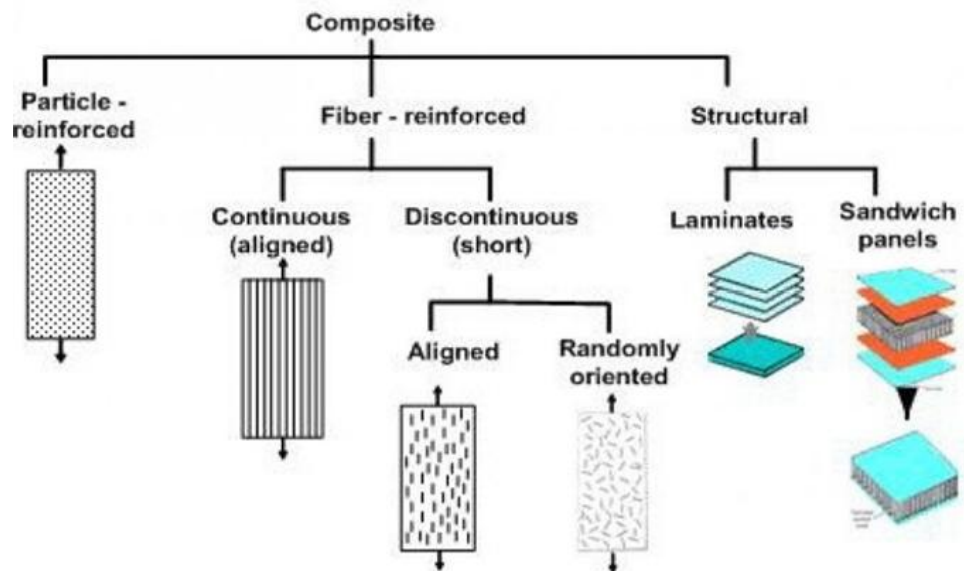
kemudian diteruskan ke penguat, sehingga penguat menanggung beban hingga mencapai kapasitas maksimum. Oleh karena itu, penguat dalam komposit berbasis serat sisal sebaiknya memiliki kekuatan lentur (*flexural strength*) dan ketangguhan tumbukan (*impact strength*) yang lebih tinggi dibandingkan dengan matriks, agar komposit mampu menahan beban lentur dan benturan secara optimal.

Berdasarkan definisi tersebut, kondisi ikatan pada permukaan sangat menentukan kekuatan suatu komposit. Kekuatan dasar komposit bergantung pada kekuatan antar muka antara matriks dan penguat. Ikatan antar muka ini berperan sebagai penghubung yang mentransmisikan tegangan dari matriks ke partikel penguat. Jika ikatan antar muka ini kuat dan baik, maka proses pemindahan tegangan juga akan berlangsung efektif. Material komposit terdiri dari dua bagian utama, yaitu matriks dan penguat. Matriks adalah fasa utama yang kontinu dan berfungsi untuk menahan serta mendukung fasa penguat sekaligus meneruskan beban yang diterima. Sedangkan penguat merupakan fasa kedua yang diskontinu dan dimasukkan ke dalam matriks. Penguat biasanya berbentuk serat, partikel, atau serpihan. Matriks memiliki sifat yang lebih ulet, sementara penguat cenderung memiliki kekuatan yang lebih tinggi dibanding matriks, sehingga penguat ini disebut juga fasa penguat (*reinforcing phase*) (Kartaman et al., 2010).

## 2.2 Klasifikasi Material Komposit

Material komposit merupakan gabungan dari dua atau lebih bahan dengan sifat berbeda yang menghasilkan performa unggul jika dibandingkan dengan bahan penyusunnya secara individual. Pengelompokan material komposit

biasanya didasarkan pada jenis matriks serta jenis penguat yang digunakan. Secara garis besar komposit diklasifikasikan berdasarkan penguatnya di bagi menjadi tiga macam:



Gambar 2. 2 Bagan Klasifikasi Komposit  
*Sumber : (Jones,1975)*

### 2.2.1 Komposit Serat (*Fiber Composite*)

Komposit serat merupakan jenis material komposit yang memanfaatkan serat sebagai elemen penguat, dengan matriks sebagai bahan pengikatnya. Komposit ini umumnya terdiri atas satu lapisan (*lamina*) yang diperkuat oleh serat atau fiber. Jenis serat yang sering digunakan meliputi serat kaca, serat karbon, serat aramid, dan lainnya. Serat-serat tersebut dapat disusun secara acak, memiliki arah tertentu, atau dibentuk dalam konfigurasi yang lebih kompleks seperti pola anyaman. Tujuan utama dari penggunaan serat ini adalah untuk meningkatkan kekuatan material. Oleh karena itu, serat sebagai elemen penguat perlu memiliki

rasio aspek yang tinggi yakni perbandingan antara panjang dan diameter agar beban dapat dialirkan secara efektif melewati titik-titik kritis yang berpotensi mengalami keretakan (Vlack, L. H., 2004).

Kekuatan komposit sangat dipengaruhi oleh jenis serat yang digunakan. Ketika komposit menerima tegangan, beban awalnya diterima oleh matriks, kemudian dialirkan ke serat yang berfungsi menahan beban hingga batas maksimal. Oleh sebab itu, serat yang digunakan harus memiliki kekuatan tarik dan modulus elastisitas yang lebih tinggi dibandingkan matriksnya (Vlack, L. H., 1985).

Dalam struktur komposit, serat memainkan peran utama sebagai penahan beban, sehingga kekuatan total komposit sangat ditentukan oleh karakteristik serat yang digunakan. Semakin kecil ukuran atau diameter serat mendekati ukuran kristal semakin tinggi kekuatannya, karena kemungkinan adanya cacat dalam material menjadi lebih sedikit.

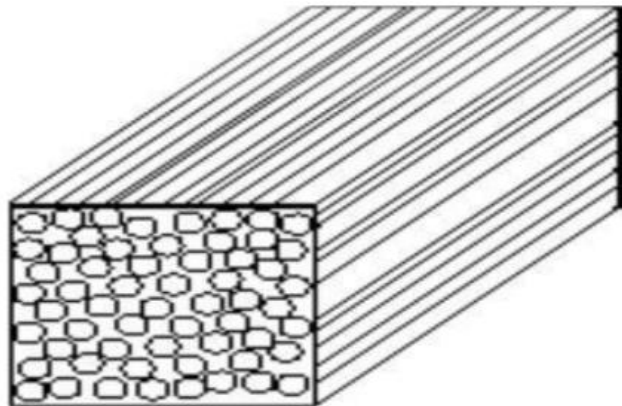
Serat (*fiber*) merupakan material yang terdiri dari potongan-potongan kecil yang tersusun membentuk struktur panjang dan menyatu. Berdasarkan asalnya, serat penguat dalam bahan komposit diklasifikasikan menjadi dua jenis utama:

- a. Serat buatan (*Sintetic fiber*), merupakan serat yang dihasilkan melalui proses kimia dan digunakan sebagai penguat dalam material komposit. Contoh dari serat jenis ini meliputi serat kaca (*fiberglass*), serat optik (*fiber optic*), dan serat poliester (*polyester fiber*).

- b. Serat Alami, Adalah serat yang berasal dari sumber daya alam dan digunakan sebagai bahan penguat dalam komposit. Serat alami bisa berasal dari hewan maupun tumbuhan, meskipun yang paling umum digunakan berasal dari tumbuhan. Contohnya adalah bulu domba (dari hewan), serta serat bambu dan serat sisal (dari tumbuhan).

Penempatan serat yang tepat serta orientasi arah serat yang sesuai sangat berpengaruh terhadap kemampuan komposit dalam menahan beban secara optimal. Serat dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa jenis, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.3, 2.4, 2.5, dan 2.6.

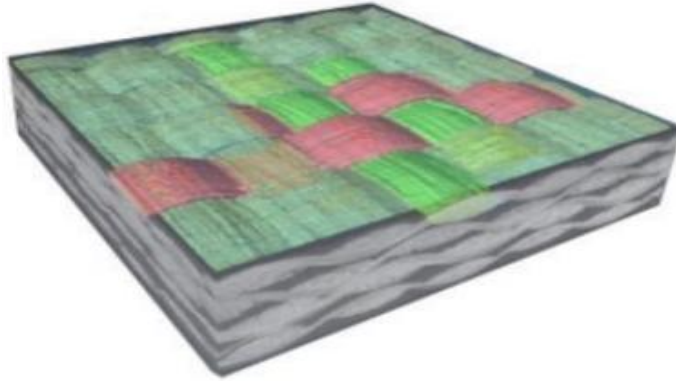
- a. Komposit serat kontinu (*continuous fiber composite*)



Gambar 2. 3 *Continous Fiber Composite*  
*Sumber: (Gibson,1994)*

Komposit serat kontinu memiliki susunan serat yang panjang dan lurus, tersusun membentuk lapisan (lamina) di dalam matriks. Meskipun memberikan kekuatan yang baik searah serat, jenis komposit ini memiliki kelemahan berupa potensi delaminasi atau pemisahan antar lapisan.

b. Komposit serat anyaman (*woven fiber composite*)

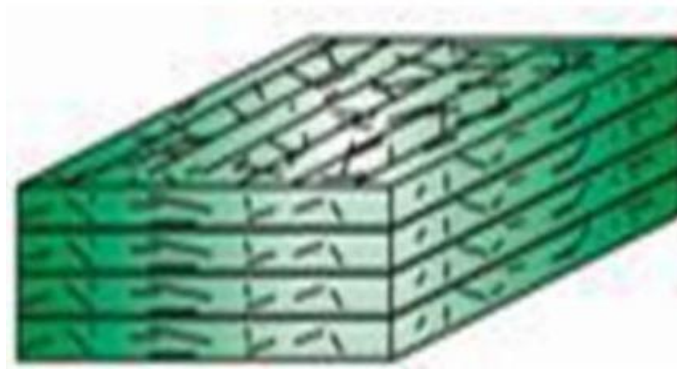


Gambar 2. 4 *Woven fiber composite*

*Sumber: (Gibson, 1994)*

Komposit jenis ini memiliki struktur serat yang saling terikat satu sama lain, sehingga lebih tahan terhadap delaminasi atau pemisahan antar lapisan. Namun, karena arah seratnya tidak sepenuhnya lurus, kekuatan dan kekakuan material cenderung sedikit berkurang dibandingkan komposit dengan serat lurus.

c. Komposit serat hibrida (*hybrid fiber composite*)

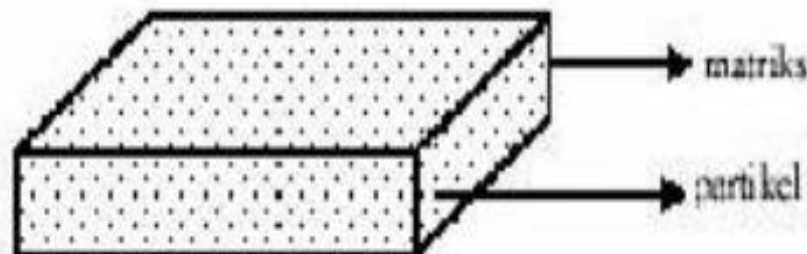


Gambar 2. 5 *Hybrid composite*

*Sumber: (Gibson, 1994)*

Komposit serat hibrida adalah jenis komposit yang mengombinasikan serat lurus dan serat acak. Tujuan dari penggabungan ini adalah untuk menutupi kekurangan masing-masing jenis serat sekaligus memaksimalkan keunggulan yang dimiliki oleh keduanya.

### 2.2.2 *Particulate Composite*



Gambar 2. 6 *Particulate Composite*  
*Sumber : (Suardia,1995)*

Komposit partikel merupakan jenis komposit yang memanfaatkan partikel atau serbuk sebagai elemen penguat, yang tersebar secara merata di dalam matriks. Contoh umum dari komposit ini adalah beton, di mana butiran seperti pasir dan batu diperkuat oleh semen sebagai matriksnya. Komposit partikel dibentuk dengan menempatkan partikel-partikel tersebut ke dalam matriks, kemudian diproses bersama melalui perlakuan tertentu seperti pemberian panas, tekanan, kelembapan, atau penambahan katalis.

Tidak seperti komposit serat acak, komposit partikel memiliki sifat isotropis, yaitu memiliki karakteristik mekanik yang sama di semua arah.

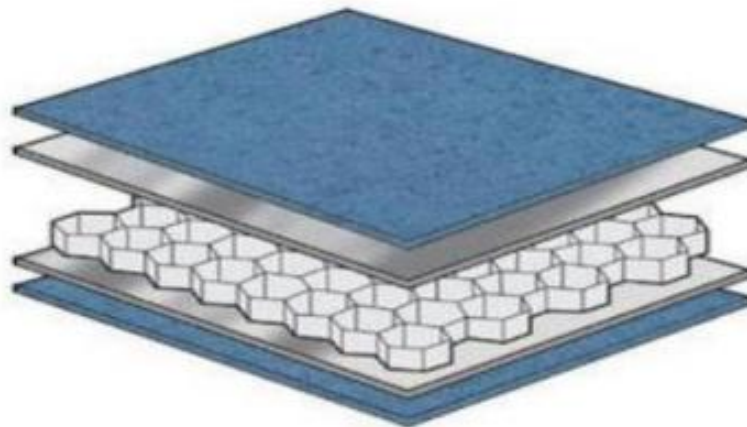


Kekuatan komposit ini bergantung pada tegangan koheren antara partikel dan matriks, yang mencerminkan kualitas ikatan antar fase penyusunnya.

### 2.2.3 Komposit Struktural (*Structural composite*)

Komposit ini terdiri dari dua atau lebih lapisan material yang digabungkan menjadi satu kesatuan, dimana setiap lapisan memiliki karakteristik dan sifat mekanik yang berbeda.

#### a. Komposit *Sandwich* (*Sandwich Composite*)



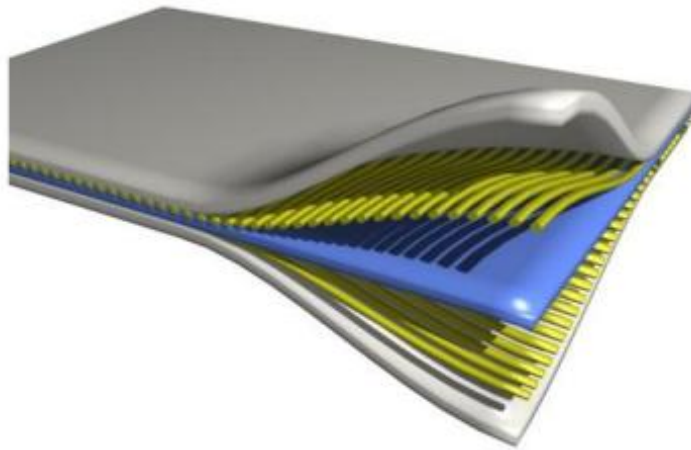
Gambar 2. 7 Komposit *Sandwich*

*Sumber : (Jumarsi, 2005)*

Komposit sandwich terdiri dari dua lapisan tipis (*skin*) yang ditempatkan di kedua sisi luar, dengan inti (*core*) yang ringan berada di antara kedua lapisan tersebut. Struktur ini umum digunakan pada aplikasi yang memerlukan kekuatan dan kekakuan lentur yang tinggi sekaligus bobot yang ringan. Lapisan skin

berperan menahan beban aksial dan transversal, sehingga harus memiliki sifat yang kuat dan kaku.

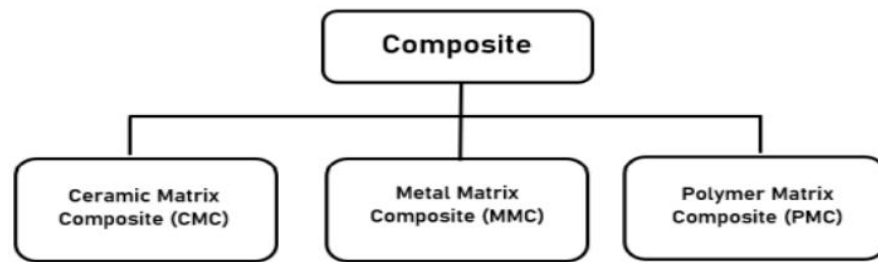
b. Komposit Laminat (*Laminated Composite*)



Gambar 2. 8 Komposit Lamina  
*Sumber : (Jumarsi, 2005)*

Komposit laminat adalah jenis komposit yang tersusun dari dua lapis atau lebih yang digabung menjadi satu kesatuan, dimana setiap lapisan memiliki karakteristik khusus masing-masing, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. Komposit laminat terdiri dari empat jenis utama, yaitu komposit serat kontinu, komposit serat anyam, komposit serat acak, dan komposit serat hibrida.

Matriks berfungsi sebagai fase pengikat yang menjaga penguat tetap pada posisinya dan mentransfer beban secara efektif. Berdasarkan jenis matriksnya, material komposit dapat dibedakan menjadi:



Gambar 2. 9 Klasifikasi Komposit Berdasarakan Jenis Matriks

*Sumber : (Callister, 2009)*

1. *Metal Matrix Composites (MMC)*, yaitu komposit yang menggunakan logam sebagai matriks utama, seperti aluminium dan magnesium. Komposit ini memiliki keunggulan dalam menahan suhu tinggi serta beban mekanik berat, sehingga banyak digunakan pada aplikasi teknik yang menuntut ketahanan termal dan kekuatan tinggi. Zhao et al. (2023) menjelaskan bahwa MMC sangat ideal untuk komponen yang beroperasi pada kondisi ekstrem karena stabilitas dan kekuatannya.
2. *Ceramic Matrix Composites (CMC)*, yaitu komposit dengan matriks keramik yang mampu bertahan pada suhu ekstrim dan tahan aus. CMC biasa dipakai dalam industri penerbangan dan energi, terutama pada komponen yang berhadapan dengan suhu tinggi dan tekanan ekstrem. Lee et al. (2022) mengemukakan bahwa CMC mendukung performa material dalam lingkungan yang sangat menuntut, seperti turbin gas dan mesin jet.
3. *Polymer Matrix Composites (PMC)*, menggunakan matriks polimer termoplastik atau termoset, seperti poliester dan epoksi. PMC memiliki bobot ringan dan biaya produksi yang relatif rendah, sehingga cocok untuk aplikasi otomotif dan konstruksi. Mallick (2007) menyatakan bahwa PMC adalah

pilihan yang efisien untuk produk yang memerlukan kombinasi kekuatan dan kepraktisan dalam pengolahan.

### 2.3 Serat Sisal

Serat atau fiber dalam bahan komposit berperan sebagai bagian utama yang menahan beban, sehingga besar kecilnya kekuatan bahan komposit sangat tergantung dari kekuatan serat pembentuknya. Semakin kecil bahan (diameter serat mendekati ukuran kristal) maka semakin kuat bahan tersebut, karena minimnya cacat pada material .

Sisal termasuk salah satu jenis serat alam yang paling umum dimanfaatkan dan mudah dibudidayakan. Tanaman ini kerap tumbuh secara liar, seperti di sepanjang pagar atau rel kereta api di India (Murherjee & Satyanarayana, 1984). Produksi sisal global diperkirakan mencapai hampir 4,5 juta ton setiap tahun, dengan Tanzania dan Brasil sebagai dua negara penghasil utama (Chand et al., 1988).

Serat sisal sendiri tergolong sebagai serat keras yang diperoleh melalui proses ekstraksi dari daun tanaman *Agave sisalana*. Meskipun berasal dari wilayah Amerika Utara dan Selatan, tanaman sisal mampu tumbuh subur di berbagai wilayah lain seperti Afrika, Hindia Barat, dan Asia Timur. Satu tanaman sisal dapat menghasilkan sekitar 200 hingga 250 helai daun, dan setiap daun mengandung sekitar 1000 hingga 1200 bundel serat. Komposisi daun tersebut

terdiri dari sekitar 4% serat, 0,75% kutikula, 8% bahan kering, dan 87,25% kandungan air (Murherjee & Satyanarayana, 1984).



Gambar 2. 10 Serat Sisal  
*Sumber: (Dokumentasi 2025)*

Serat sisal, yang dihasilkan dari tanaman *Agave sisalana*, merupakan salah satu jenis serat alami yang banyak dimanfaatkan sebagai bahan penguat dalam pembuatan komposit. Hal ini disebabkan oleh ketersediaan serat sisal yang cukup melimpah di berbagai wilayah tropis, serta biaya produksinya yang relatif rendah dibandingkan dengan serat sintetis. Selain itu, penggunaan serat sisal memberikan keuntungan dari segi keberlanjutan lingkungan karena bersifat *biodegradable* dan berasal dari sumber terbarukan (John & Thomas, 2008). Secara kimiawi, serat sisal terdiri dari tiga komponen utama yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin, dengan proporsi yang berpengaruh besar terhadap performa mekanik dan ketahanan serat tersebut. Selulosa sebagai komponen utama memiliki persentase sekitar 60 hingga 80%, yang berperan penting dalam memberikan kekuatan tarik dan kekakuan pada serat. Hemiselulosa sekitar 10 sampai 20% berfungsi sebagai bahan pengikat antar fibril selulosa, sedangkan lignin yang berkisar antara 8

sampai 12% bertindak sebagai penguat struktur serat sekaligus memberikan daya tahan terhadap serangan biologis dan kimia (Fiore et al., 2015).

Secara umum, kekuatan dan kekakuan serat tumbuhan dipengaruhi oleh kandungan selulosa serta sudut spiral yang terbentuk antara mikrofibril pada lapisan sekunder dinding sel dan sumbu utama serat. Selain itu, struktur dan sifat dari serat alam sangat bergantung pada asal serta usia serat tersebut (Chand et al., 1986). Pada serat sisal, kekuatan tariknya bervariasi di sepanjang serat. Bagian bawah cenderung memiliki kekuatan tarik dan modulus elastisitas yang lebih rendah dibanding bagian atas, meskipun daya tahan terhadap keretakan pada bagian bawah lebih tinggi. Adapun bagian tengah serat menunjukkan kekuatan dan kekakuan yang paling tinggi. Karakteristik serat sisal dari berbagai hasil penelitian dapat dilihat pada tabel berikut. Perlu diperhatikan bahwa selain struktur dan sifat alaminya, kondisi pengujian seperti panjang sampel dan kecepatan pengujian juga turut memengaruhi sifat mekanik serat.

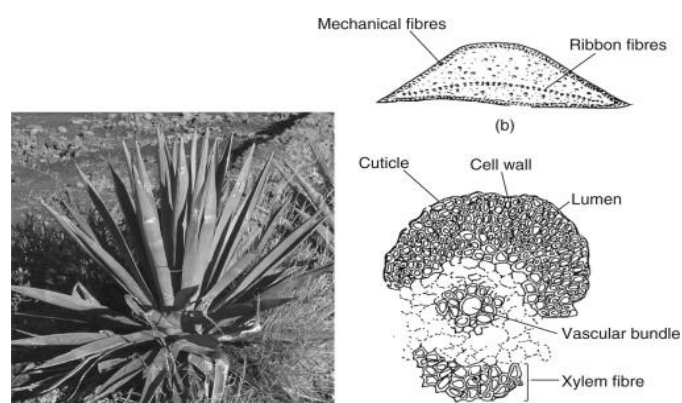
Tabel 2. 1 Sifat Serat Sisal

| Densitas<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Moisture<br>Content (%) | Kekuatan<br>Tarik (MPa) | Modulus<br>(GPa) | Maximum<br>Strain (%) | Diameter<br>(µm) |
|----------------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------|-----------------------|------------------|
| 1450                             | 11                      | 604                     | 9.2-15.8         | -                     | 50-200           |
| 1450                             | -                       | 530-640                 | 9.4-22           | 3-7                   | 50-300           |
| -                                | -                       | 347                     | 14               | 5                     | -                |
| 1030                             | -                       | 500-600                 | 16-21            | 3.6-5.1               | -                |
| 1410                             | -                       | 400-700                 | 9-20             | 5-14                  | 100-300          |
| 1400                             | -                       | 450-700                 | 7-13             | 4-9                   | -                |
| -                                | -                       | 530-630                 | 17-22            | 3.64-5.12             | 100-300          |
| 1450                             | -                       | 450-700                 | 7-13             | 4-9                   | -                |

*Sumber : (Nur Azizah 2020 Universitas Negeri Semarang.)*

Menurut Mukherjee dan Satyanarayana (1984), diameter serat tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat mekanik serat sisal. Namun, kekuatan tarik dan tingkat perpanjangan saat putus menurun dengan bertambahnya panjang serat dan *modulus Young*. Kecepatan pengujian yang lebih tinggi cenderung meningkatkan kekuatan tarik dan modulus, meskipun tidak terlalu memengaruhi perpanjangan serat. Pada kecepatan 500 mm/menit, terjadi penurunan tajam pada kekuatan tarik yang disebabkan oleh cacat pada serat dan dominasi daerah amorf yang menyerap beban lebih banyak.

Penelitian Chand dan Hashmi (1993) menunjukkan bahwa suhu dan usia tanaman juga memengaruhi sifat mekanik serat sisal. Kenaikan suhu menyebabkan penurunan pada kekuatan tarik, modulus, dan kekasaran serat. Pengaruh usia tanaman paling terlihat pada suhu 80°C, di mana sifat mekanik serat menurun seiring bertambahnya usia. Namun, pada suhu 100°C, pengaruh usia tanaman menjadi kurang signifikan karena proses penguapan air dan zat volatil yang lebih intensif dalam serat.



Gambar 2. 11 Tanaman Sisal

Sumber: (Young, Mallick, & Hodgkinson, 2015)

Tabel 2. 2 Perbandingan sifat mekanis serat sisal pada suhu dan usia tanaman

| Usia | Kekasaran/Volume (MJ/m <sup>3</sup> ) |      |       | Kekuatan Tarik MPa |      |       | Modulus (GPa) |      |       |
|------|---------------------------------------|------|-------|--------------------|------|-------|---------------|------|-------|
|      | 30°C                                  | 80°C | 100°C | 30°C               | 80°C | 100°C | 30°C          | 80°C | 100°C |
| 3    | 4.8                                   | 4.9  | 4.1   | 452                | 350  | 303   | 26            | 29   | 21    |
| 4    | 5.5                                   | 7.8  | 4.3   | 508                | 355  | 300   | 29            | -    | 22    |
| 7    | 6.0                                   | 5.2  | 4.7   | 500                | 300  | 280   | 34            | 22   | 17    |

*Sumber : (Nur Azizah 2020)*

Dalam pengaplikasiannya sebagai bahan penguat komposit, serat sisal telah terbukti dapat meningkatkan berbagai sifat mekanik material komposit, termasuk kekuatan tarik, bending, kekakuan, serta ketangguhan. Namun, salah satu kendala utama dalam penggunaan serat alam adalah lemahnya ikatan antar muka antara serat dan matriks polimer, yang dapat mengakibatkan sifat mekanik komposit menjadi kurang optimal. Oleh karena itu, perlakuan permukaan serat secara mekanis, seperti pengamplasan atau abrasi, banyak diterapkan untuk meningkatkan kualitas ikatan tersebut tanpa menggunakan perendaman kimia (Saba et al., 2017).

Perlakuan mekanis ini berfungsi untuk membersihkan permukaan serat dari kotoran dan meningkatkan kekasaran, sehingga memperbesar luas permukaan kontak dan memperkuat ikatan mekanik antara serat dan matriks. Metode ini juga membantu menghilangkan minyak alami atau zat penghambat lain yang dapat mengurangi *adhesi*, tanpa mengubah sifat kimia serat secara signifikan (Joseph et al., 2016).



Perlakuan permukaan mekanis dan fisik pada serat sisal, seperti pengamplasan atau abrasi, bertujuan untuk membersihkan permukaan serat dari kotoran, minyak alami, dan lapisan halus yang dapat menghambat adhesi dengan matriks poliester. Proses ini meningkatkan kekasaran permukaan serat sehingga luas kontak antara serat dan matriks menjadi lebih besar, yang secara langsung memperkuat ikatan mekanik antar muka. Dengan ikatan yang lebih baik, distribusi gaya dan beban pada material komposit menjadi lebih merata, sehingga meningkatkan ketahanan mekanik serta daya tahan material terhadap beban siklik dan benturan. Perlakuan ini juga mengurangi risiko delaminasi atau kerusakan antar lapisan pada saat material mengalami beban berulang, tanpa mengubah sifat kimia serat secara signifikan sehingga karakteristik alami serat sisal tetap terjaga. Dengan keunggulan tersebut, serat sisal menjadi pilihan yang menjanjikan sebagai bahan penguat dalam pengembangan material komposit berkelanjutan yang hemat biaya dan ramah lingkungan (Fatima, Anwar, & Muhammad, 2020).

## **2.4 Resin Poliester sebagai Matriks Komposit**

Resin poliester merupakan salah satu jenis matriks polimer yang paling banyak digunakan dalam pembuatan komposit berbasis serat alam. Hal ini dikarenakan resin poliester memiliki berbagai keunggulan, seperti biaya yang relatif terjangkau, kemudahan dalam proses manufaktur, serta ketahanan yang baik terhadap serangan bahan kimia dan kelembaban lingkungan (Mallick, 2007). Resin ini termasuk dalam kelompok polimer termoset, yang berarti ia mengalami proses pengerasan melalui polimerisasi kimia sehingga membentuk jaringan tiga dimensi yang sangat kaku dan stabil secara struktural. Struktur jaringan tersebut

membuat resin poliester mampu mempertahankan bentuknya dan tahan terhadap deformasi mekanik selama penggunaan (Mallick, 2007). Adapun sifat mekanik resin poliester:

Tabel 2. 3 Sifat Mekanis Resin Poliester

| Sifat Mekanis                                 | Nilai Umum                  | Keterangan                                                                                            |
|-----------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kekuatan Tarik<br>( <i>Tensile Strength</i> ) | 40 – 90 MPa                 | Menunjukkan kemampuan resin menahan gaya tarik sebelum patah. Semakin tinggi, semakin kuat.           |
| Modulus Elastisitas                           | 2.0 – 4.5 GPa               | Mengukur kekakuan resin terhadap gaya tarik. Nilai tinggi berarti bahan tidak mudah melar.            |
| Kekuatan Lentur                               | 70 – 120 MPa                | Kemampuan resin menahan beban lentur tanpa penguat. Nilai ini meningkat bila dikombinasi serat.       |
| Modulus Lentur                                | 2.5 – 4.5 GPa               | Ukuran kekakuan terhadap lenturan; penting untuk desain struktur komposit.                            |
| Ketangguhan Impak (Izod)                      | 10 – 20 J/m                 | Daya serap energi benturan mendadak tanpa patah. Nilai ini biasanya rendah untuk resin tanpa serat.   |
| Densitas                                      | $\pm 1.2$ g/cm <sup>3</sup> | Menunjukkan berat jenis bahan, penting untuk pertimbangan ringan/tidaknya struktur akhir.             |
| Elongasi saat Putus                           | 1% – 2%                     | Ukuran keuletan atau seberapa jauh resin bisa memanjang sebelum patah; resin poliester umumnya getas. |

*Sumber: (Bledzki & Gassan, 2005)*

## 2.5 Peran Katalis dalam Polimerisasi Resin Poliester

Dalam sintesis material komposit berbasis resin poliester, keberadaan katalis memegang peranan krusial untuk mempercepat proses reaksi polimerisasi.

Katalis adalah senyawa yang dapat mempercepat laju reaksi kimia dengan menurunkan energi aktivasi, tanpa ikut bereaksi secara permanen dalam produk akhir (Fikran et al., 2023). Melalui penambahan katalis, proses pengerasan atau curing resin dapat berlangsung lebih efisien, baik dari segi waktu maupun energi, tanpa mengurangi kualitas akhir dari material yang dihasilkan.

Katalis berperan sebagai pemicu yang mempercepat reaksi kimia tanpa mengalami perubahan struktur secara permanen. Dalam polimerisasi resin poliester, katalis digunakan untuk memulai dan mempercepat reaksi antara monomer dengan senyawa lain, sehingga membentuk rantai panjang polimer. Reaksi ini menghasilkan produk akhir berupa resin yang telah mengeras. Penambahan katalis sangat penting untuk mengurangi waktu pengerasan resin, yang dalam kondisi normal dapat berlangsung sangat lambat (Fikran et al., 2021). Beberapa jenis katalis banyak digunakan dalam sistem polimerisasi resin poliester, seperti:

- a. Inisiator berbasis peroksida seperti benzoyl peroxide (BPO), yang bekerja dengan membentuk radikal bebas untuk memulai reaksi polimerisasi.
- b. Akselerator logam, seperti *kobalt naphthenate*, yang mempercepat dekomposisi inisiator peroksida dan meningkatkan efisiensi reaksi.
- c. Kombinasi katalis, yang menggabungkan inisiator dan akselerator untuk memastikan proses *curing* yang optimal dalam waktu yang singkat.

Pemilihan jenis katalis yang tepat, serta konsentrasinya, sangat mempengaruhi laju pengerasan dan sifat mekanik akhir dari komposit. Pada

sistem resin poliester tak jenuh, reaksi polimerisasi umumnya melibatkan proses radikal bebas. Inisiator seperti *benzoyl peroxide* mengalami dekomposisi termal atau dipercepat oleh akselerator logam (misalnya kobalt) untuk menghasilkan radikal bebas. Radikal bebas ini akan menyerang ikatan rangkap pada monomer, membentuk rantai aktif yang terus tumbuh hingga membentuk struktur polimer. Katalis berperan penting dalam mempercepat reaksi ini, memastikan bahwa resin mengalami pengerasan secara merata dan sempurna (Fikran et al., 2023).

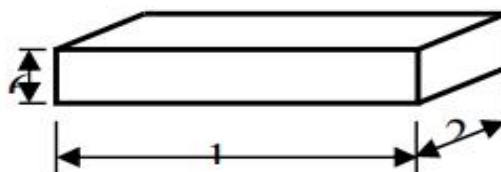
Penggunaan katalis yang sesuai dapat memperbaiki sifat mekanik komposit, seperti kekuatan tarik, ketahanan impak, dan kekakuan. Sebaliknya, penggunaan katalis dalam jumlah berlebihan atau tidak sesuai dapat menyebabkan pengerasan yang terlalu cepat, menghasilkan gelembung udara, atau bahkan reaksi yang tidak sempurna. Fikran et al. (2023) melaporkan bahwa penambahan katalis berbasis kobalt dalam kadar optimum dapat meningkatkan modulus elastisitas dan kekuatan lentur komposit hingga 15% dibandingkan sistem tanpa katalis. Hal ini menunjukkan bahwa peran katalis tidak hanya mempercepat proses, tetapi juga berpengaruh signifikan terhadap performa mekanik komposit yang dihasilkan.

## **2.6 Sifat Mekanik Komposit *Bending* dan *Toughness***

Sifat mekanik merupakan aspek penting yang menjadi tolok ukur utama dalam menilai performa material komposit, khususnya pada aplikasi struktural yang menuntut daya tahan dan kekuatan optimal. Berikut adalah dua sifat mekanik utama :

### 2.6.1 Kekuatan Lentur (*Bending Strength*)

Kekuatan lentur mengacu pada kemampuan suatu material untuk menahan beban yang menyebabkan pembengkokan tanpa mengalami kegagalan atau kerusakan. Beberapa faktor yang sangat mempengaruhi kekuatan lentur pada material komposit meliputi fraksi volume serat, yakni seberapa banyak serat yang terkandung dalam matriks orientasi serat yang menentukan arah kekuatan material kualitas ikatan antar muka antara serat dan matriks yang memastikan transfer tegangan berjalan efektif serta distribusi beban yang merata di seluruh struktur komposit. Faktor-faktor tersebut saling berinteraksi dan bersama-sama menentukan ketahanan material terhadap beban lentur yang bekerja (Khoshnoud et al., 2021).



Gambar 2. 12 Spesimen uji bending ASTM D790  
*Sumber: (Gede widiarttha, Jurnal Teknik Mesin 2022)*

Tegangan lentur maksimum merupakan tegangan tertinggi yang terjadi pada permukaan terluar spesimen saat menerima beban maksimum sebelum material mengalami kegagalan. Nilai ini dihitung menggunakan rumus berikut untuk menunjukkan seberapa besar beban lentur yang dapat ditahan material sebelum rusak:

$$\sigma_b = \frac{3PL}{2bt^2} \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan :

$\sigma_b$  = Tegangan lentur maksimum (MPa)

P = Gaya maksimum (N)

L = Panjang bentang (mm)

b = Lebar spesimen (mm)

t = Tebal spesimen (mm)

Selanjutnya, nilai regangan lentur maksimum ( $\epsilon_b$ ) pada permukaan luar spesimen dihitung dengan rumus:

$$\epsilon_b = \frac{6dt}{2L^2} \dots\dots\dots (2.2)$$

Keterangan :

$\epsilon_b$  = Regangan lentur maksimum (tanpa satuan)

d = Defleksi maksimum di titik tengah bentang (mm)

L = Panjang bentang (mm)

t = Tebal spesimen (mm)

Untuk menggambarkan kekakuan material terhadap lenturan, digunakan parameter modulus elastisitas lentur ( $E_b$ ), yang dihitung dari kemiringan kurva gaya terhadap defleksi di daerah elastis. Rumusnya adalah:

$$E_b = \frac{L^3 m}{4bt^3} \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan :

- $E_b$  = Modulus elastisitas lentur (MPa atau N/mm<sup>2</sup>)
- $m$  = Gradien garis lurus pada kurva gaya-defleksi (N/mm)
- $L$  = Panjang bentang (mm)
- $t$  = Tebal spesimen (mm)
- $b$  = Lebar spesimen (mm)

### 2.6.2 Ketangguhan (*Toughness*)

Ketangguhan adalah kemampuan suatu material untuk menyerap energi hingga titik kegagalan, yang mencerminkan ketahanannya terhadap retak, patah, atau benturan. Material dengan ketangguhan tinggi mampu menahan deformasi lebih lama sebelum rusak. Faktor utama yang memengaruhi ketangguhan adalah kekuatan ikatan antara serat dan matriks serta bagaimana serat tersebar dalam matriks tersebut. Ikatan yang kuat dan distribusi serat yang merata membantu menahan serta menyebarkan tegangan, sehingga memperlambat penyebaran retak dan meningkatkan ketahanan material terhadap benturan (Joseph et al., 2016).

Penelitian terbaru oleh Zhao et al. (2023) menunjukkan bahwa komposit berbasis serat alam dengan matriks poliester yang diperlakukan secara optimal melalui proses perlakuan permukaan dan penyesuaian komposisi dapat meningkatkan kekuatan lentur hingga 35% dan ketangguhan hingga 28% dibandingkan matriks poliester tanpa penguat. Temuan ini menegaskan pentingnya pemilihan dan perlakuan serat serta matriks untuk memperoleh sifat mekanik yang lebih baik pada material komposit, sehingga cocok untuk aplikasi struktural yang ringan hingga sedang.

Untuk mengukur ketangguhan secara tepat, digunakan metode pengujian sesuai standar ASTM D6110-04. Metode ini memakai uji benturan Charpy dengan spesimen berbentuk balok yang memiliki takikan V. Spesimen ditempatkan di atas tumpuan dan diberikan benturan dengan beban jatuh secara vertikal hingga patah. Energi yang terserap saat patah dicatat dan digunakan untuk menghitung nilai ketangguhan material. Pengujian ini sangat penting untuk menilai kemampuan material komposit menahan benturan mendadak, terutama untuk komposit serat alam yang sifatnya bervariasi. ASTM D6110-04 menyediakan prosedur yang cepat dan efektif untuk mengetahui performa ketangguhan material secara konsisten (ASTM International, 2004). Untuk menghitung ketangguhan berdasarkan uji Charpy sesuai ASTM D6110-04, digunakan rumus berikut :

$$k = \frac{E}{A} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$Ao = l \times T \dots\dots\dots (2.5)$$

Keterangan :

$k$  = Kekuatan impak (J/cm<sup>2</sup>)

$E$  = Energi serap (J)

$A$  = Luas penampang (cm<sup>2</sup>)

$L$  = Lebar efektif spesimen (cm)

$T$  = Tebal spesimen (cm)



## 2.7 Pengaruh Persentase Serat Sisal terhadap Sifat Mekanik Komposit

Persentase serat sisal dalam matriks poliester, yang biasanya disebut sebagai fraksi volume serat, memiliki peran penting dalam menentukan sifat mekanik komposit secara keseluruhan. Berikut penjelasan pengaruhnya secara detail:

### a. Peningkatan Sifat Mekanik pada Persentase Optimal

Penambahan serat sisal ke dalam matriks poliester hingga mencapai batas optimal mampu meningkatkan sifat mekanik komposit, khususnya kekuatan lentur dan ketangguhan. Hal ini terjadi karena serat sisal berfungsi sebagai penguat yang membantu mendistribusikan tegangan secara lebih merata di dalam material. Selain itu, interaksi antar muka antara serat dan matriks menjadi lebih baik sehingga transfer beban dari matriks ke serat menjadi lebih efektif, yang pada akhirnya meningkatkan performa mekanik (Monteiro et al., 2020).

### b. Penurunan Sifat Mekanik pada Persentase Berlebih

Persentase serat sisal yang sangat tinggi, seperti pada kisaran 40-50%, umumnya menyebabkan penurunan sifat mekanik komposit karena fenomena aglomerasi serat yang signifikan. Pada tingkat serat yang tinggi ini, serat-serat cenderung menggumpal dan tidak tersebar merata dalam matriks, sehingga distribusi serat menjadi tidak homogen. Penggumpalan tersebut meningkatkan porositas atau rongga udara di dalam matriks, yang selanjutnya mengurangi kohesi antar serat dan matriks. Adhesi antar muka yang buruk ini menyebabkan

transfer tegangan dari matriks ke serat menjadi tidak optimal, sehingga ikatan mekanis yang seharusnya memperkuat struktur komposit menjadi melemah. Selain itu, tingginya kandungan serat yang melebihi kapasitas ikatan matriks juga mengurangi kemampuan matriks untuk membungkus dan mengikat serat dengan efektif. Akibat dari kombinasi tersebut adalah berkurangnya kemampuan komposit dalam menahan beban lentur dan menyerap energi benturan, sehingga performa mekanik secara keseluruhan menurun secara signifikan pada persentase serat sisal di atas 40-50%. Oleh karena itu, meskipun penambahan serat sisal dapat meningkatkan sifat mekanik komposit pada kadar tertentu, melebihi batas tersebut justru akan menimbulkan efek negatif karena penurunan adhesi dan peningkatan porositas yang mengganggu integritas struktural komposit (Khoshnoud et al., 2021; Mohanty, Misra, & Drzal, 2005; Bledzki & Gassan, 1999).

#### c. Pentingnya Pemilihan Fraksi Volume Serat yang Tepat

Pemilihan kadar serat sisal yang tepat sangat krusial agar komposit dapat mencapai performa mekanik terbaik. Keseimbangan antara peningkatan kekuatan dan ketangguhan dengan penghindaran efek negatif seperti aglomerasi dan porositas harus diperhatikan secara seksama dalam proses pembuatan material komposit (Monteiro et al., 2020; Khoshnoud et al., 2021).

Persentase serat sisal dalam matriks poliester menjadi parameter penting yang menentukan keberhasilan peningkatan sifat mekanik komposit. Pemilihan fraksi volume serat yang tepat memungkinkan peningkatan signifikan pada

kekuatan lentur dan ketangguhan, sementara penggunaan serat yang berlebihan justru dapat menimbulkan efek negatif seperti aglomerasi dan porositas yang menurunkan performa material. Oleh sebab itu, optimasi kadar serat sisal sangat penting untuk menghasilkan komposit yang memiliki kekuatan mekanik dan daya tahan terbaik sesuai kebutuhan aplikasi struktural. Selain pengujian mekanik yang dilakukan untuk menentukan sifat bending dan ketangguhan komposit, pengujian visual terhadap permukaan spesimen pasca-uji juga dilakukan sebagai bagian penting dari evaluasi kualitas material.

Pengujian visual ini mengacu pada standar ASTM D610-04 yang digunakan untuk mengidentifikasi adanya degradasi permukaan, retak, perubahan warna, maupun cacat visual lain yang mungkin terjadi selama proses pengujian mekanik. Informasi yang diperoleh dari pengujian visual ini sangat berguna untuk melengkapi hasil uji mekanik karena dapat memberikan gambaran mengenai kerusakan mikro yang tidak selalu terdeteksi melalui pengukuran kekuatan atau deformasi saja. Dengan demikian, pengujian visual menjadi salah satu indikator penting dalam menilai keandalan dan performa komposit berbasis serat sisal serta bagaimana variasi persentase serat mempengaruhi ketahanan material terhadap kerusakan permukaan.

## **2.8 Penelitian Terkait**

Berbagai penelitian sebelumnya telah banyak dilakukan untuk mengevaluasi pemanfaatan serat sisal sebagai bahan penguat dalam komposit berbasis matriks poliester, khususnya dalam upaya meningkatkan karakteristik

mekanik seperti kekuatan tarik, kekuatan lentur, dan ketangguhan. Hasil-hasil tersebut menjadi landasan penting bagi pengembangan formulasi dan pendekatan eksperimental dalam penelitian ini, khususnya dalam hal variasi fraksi volume serat sisal yang digunakan.

Fikran et al. (2023) melakukan studi terhadap komposit lamina berbahan serat sisal dengan variasi fraksi volume serat sebesar 5% dan 15% yang dikombinasikan dengan matriks poliester. Pengujian dilakukan menggunakan metode cetak laminasi dan uji tarik berdasarkan standar ASTM D638-02. Hasil penelitian menunjukkan adanya peningkatan signifikan pada kekuatan tarik, yakni dari 16,98 MPa menjadi 45,18 MPa, serta kenaikan pada nilai regangan maksimum dari 4,52% menjadi 9,68%. Temuan ini menyimpulkan bahwa peningkatan kandungan serat sisal dalam komposit berbanding lurus dengan peningkatan tegangan maksimum dan ketangguhan, meskipun perlu diwaspadai adanya batas optimal untuk menghindari penurunan sifat mekanik akibat kelebihan serat.

Joseph et al. (2016) juga menemukan bahwa penambahan serat sisal dalam rentang 4% hingga 8% ke dalam matriks resin poliester dapat meningkatkan ketangguhan material komposit hingga sebesar 30%. Penelitian tersebut menegaskan bahwa terdapat kisaran fraksi volume serat yang optimal untuk mencapai peningkatan performa mekanik tanpa mengalami efek negatif seperti aglomerasi serat atau distribusi yang tidak merata, yang berpotensi menurunkan kekuatan struktural komposit.

Studi yang dilakukan oleh Monteiro et al. (2020) menunjukkan bahwa penggunaan serat alam, termasuk serat sisal, dalam pembuatan material komposit dapat meningkatkan sifat mekanik, terutama kekuatan lentur (*bending strength*), asalkan serat digunakan dalam jumlah yang optimal. Peningkatan kekuatan lentur ini paling signifikan terjadi pada fraksi volume serat antara 6% hingga 8%. Dalam rentang ini, distribusi serat di dalam matriks polyester masih relatif merata, dan ikatan antar muka (*interfacial bonding*) antara serat dan matriks berada dalam kondisi optimal. Ikatan antar muka yang baik sangat penting karena memungkinkan beban yang diberikan pada komposit dapat didistribusikan secara efektif dari matriks ke serat, yang memiliki sifat mekanik lebih unggul. Namun, ketika persentase serat sisal ditingkatkan melebihi 10%, mulai muncul beberapa permasalahan struktural.

Peningkatan jumlah serat secara berlebihan sering kali menyebabkan agregasi atau penggumpalan serat, yang pada akhirnya menghasilkan ketidakteraturan dalam distribusi serat di dalam matriks. Hal ini mengganggu homogenitas material dan menciptakan titik-titik lemah (*weak points*) pada struktur komposit. Selain itu, kelebihan serat juga dapat mengganggu pembasahan serat oleh resin polyester, sehingga ikatan antar muka menjadi tidak sempurna. Pembasahan yang tidak optimal berarti gaya adhesi antara serat dan matriks menjadi rendah, sehingga serat tidak mampu mentransfer beban dengan baik. Akibatnya, terjadi penurunan kualitas ikatan antar muka dan melemahnya integritas mekanik komposit secara keseluruhan, termasuk turunnya nilai kekuatan bending maupun ketangguhan (*toughness*). Secara ringkas, meskipun

serat sisal berkontribusi positif terhadap sifat mekanik komposit, penting untuk menjaga proporsi serat dalam batas optimal, karena terlalu sedikit serat tidak akan memberikan penguatan yang memadai, sementara terlalu banyak serat dapat menyebabkan penurunan performa akibat cacat struktur internal.

Berdasarkan hasil-hasil dari penelitian terdahulu tersebut, studi ini difokuskan pada pengaruh variasi persentase serat sisal yang lebih rinci, yaitu sebesar 2%, 4%, 6%, 8%, dan 10%, terhadap kekuatan lentur dan ketangguhan komposit berbasis poliester. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi fraksi volume serat yang paling optimal dalam meningkatkan performa mekanik, sekaligus menghindari potensi penurunan kualitas akibat aglomerasi serat dan porositas pada struktur komposit.